

# 混凝土缺陷细观多尺度研究

郭超,李硕,刘殿宏

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 基于细观多尺度理论,针对含初始缺陷(气孔)的混凝土强度,进行参数化研究。方法 制作不同缺陷水平的立方体混凝土试件,进行单轴压缩试验;在此基础上,基于 Monte Carlo 法,编制 Python 脚本程序,驱动 ABAQUS 随机有限元平台,进行混凝土三级配骨料颗粒 2D 和 3D 细观模拟研究。结果 球形骨料混凝土损伤的 3D 数值模拟分析结果为斜剪形破坏,与混凝土单轴压缩试验的破坏结果吻合;2D 多边形、圆形、椭圆形骨料的数值模拟结果均与试验结果相差较大。结论 3D 细观数值模拟分析更适用于混凝土细观缺陷理论研究。

**关键词** 初始缺陷;单轴压缩;有限元;随机骨料;细观模拟

中图分类号 TU528

文献标志码 A

## Meso Multi Scale Study on Concrete Defects

GUO Chao, LI Shuo, LIU Dianhong

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** Based on the meso multi-scale theory, a parametric study on the strength of concrete with initial defects (pores) is carried out. The cube concrete specimens with different defect levels were fabricated and tested by uniaxial compression. On this basis, based on Monte Carlo method, Python script program was written and ABAQUS stochastic finite element platform was driven to conduct 2D and 3D mesoscopic simulation research of concrete tertiary aggregate particles. Results The 3D numerical simulation results of spherical aggregate concrete damage are oblique shear failure, which is consistent with the failure results of concrete uniaxial compression test. The numerical simulation results of 2D polygon, circular and elliptic aggregate are quite different from the experimental results. The above analysis shows that 3D mesoscopic numerical simulation analysis is more suitable for theoretical research on mesoscopic defects of concrete.

**Key words:** initial defect; uniaxial compression; finite element; random aggregate; mesoscopic simulation

混凝土可以看作是由砂浆、骨料、砂浆与骨料界面间过渡区 (Interfacial Transition Zone, ITZ) 以及初始缺陷 (气孔) 四相组成的非均质复合材料。混凝土中分布着各种孔隙和微裂缝, 主要的孔隙结构类型有凝胶孔、毛细管孔、水平裂缝、残余孔隙、界面微裂缝等<sup>[1-2]</sup>。混凝土中骨料的粒径和级配、水泥用量、密实程度、水胶比和其养护条件、所处环境的湿度、放热过程等不同参数对微裂纹数量有着很大的影响<sup>[3]</sup>。在混凝土中体积较小的初始孔隙, 虽所占体积百分比不高, 但其对于混凝土的裂缝分布和扩展程度的影响巨大, 而混凝土宏观力学行为的非线性恰恰由此造成<sup>[4]</sup>。传统试验技术没有考虑到细观结构问题, 难以精确地研究混凝土细观力学性能, 包括裂纹扩展<sup>[5-6]</sup>、损伤<sup>[7]</sup>以及尺寸效应<sup>[8]</sup>。

大型电子计算机的出现, 为研究混凝土细观结构对混凝土材料破坏、细观裂缝发展与宏观力学性能之间的关系提供了计算条件<sup>[9]</sup>。Ł. Skar yński 等<sup>[10]</sup>利用 X 射线研究了缺口混凝土的裂缝宽度、长度、高度和形状; 袁则循等<sup>[11]</sup>应用 ICT 技术、数字散斑技术揭示混凝土试件内局部产生及发展过程; 苏林王等<sup>[12]</sup>利用 CT 扫描获取混凝土内部的缺陷和破损情况, 对混凝土的缺陷进行定量分析; L. Kai 等<sup>[13]</sup>通过背散射电子扫描电子显微镜, 确定了 ITZ 的孔隙率和厚度。在此基础上, 进一步引入曲面函数来计算界面 ITZ 的体积分数。

目前, 随着有限元数值模拟的成熟, 国内外学者根据对混凝土细观结构的认识, 提出了很多混凝土细观力学模型。最常用细观模型有随机粒子模型<sup>[14]</sup>、随机骨料模型<sup>[15]</sup>、随机力学特性模型<sup>[16]</sup>、时间逆转模型<sup>[17]</sup>、基于数字图像的模式<sup>[18]</sup>等。高辉等<sup>[19]</sup>采用灰色关联分析方法揭示了在总孔隙率相同或相近时, 混凝土的界面过渡区宽度越窄, 混凝土的抗压强度越高。而在现有的细观尺度模型

中, 很少考虑裂隙、气孔等缺陷<sup>[20-23]</sup>对混凝土材料的损伤和断裂性能的影响。

考虑到混凝土各相在细观尺度上的相互作用, 笔者通过建立混凝土细观模型, 以气孔含量作为随机骨料力学性能的影响因素, 生成骨料及气孔随机分布的 2D 和 3D 细观混凝土模型, 探索在 2D 和 3D 混凝土细观模型下, 气孔对混凝土强度与应变的影响, 在此基础上, 利用现有试验结果, 验证模型的可靠性, 为混凝土强度及应变的预测提供依据。

## 1 混凝土细观模型

### 1.1 骨料级配

骨料粒径分布是混凝土力学性能的重要参数, 按照 Fuller 级配曲线配置混凝土可使混凝土具有最优的密实度和宏观强度<sup>[24]</sup>。对应的计算式<sup>[25]</sup>:

$$P(d) = \left( \frac{d}{d_{\max}} \right)^n \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $P(d)$  为通过筛孔直径为  $d$  的骨料质量的百分比;  $d_{\max}$  为最大骨料直径;  $n$  为指数, 一般取值  $0.45 \sim 0.70$ <sup>[20]</sup>, 笔者取  $n = 0.5$ 。

3D 情况下,  $[d_s, d_{s+1}]$  级配段内骨料的数量, 可通过式(2)计算<sup>[26]</sup>:

$$V_{\text{agg}}[d_s, d_{s+1}] = \frac{P(d_{s+1}) - P(d_s)}{P(d_{\max}) - P(d_{\min})} \cdot R_{\text{agg}} \cdot V_{\text{con}} \quad (2)$$

式中:  $V_{\text{agg}}[d_s, d_{s+1}]$  为  $[d_s, d_{s+1}]$  级配段内骨料的体积;  $V_{\text{con}}$  为混凝土的体积;  $R_{\text{agg}}$  为骨料体积比, 可通过式(3)计算:

$$VA_{\text{agg}} = \frac{w_{\text{agg}}}{\rho_{\text{agg}} V_{\text{con}}} \quad (3)$$

式中:  $w_{\text{agg}}$  为骨料总质量;  $\rho_{\text{agg}}$  为骨料密度。

由于 3D 混凝土细观模型的计算代价巨大, 通常采用概率统计方法将 3D 混凝土数值模型转换为 2D 混凝土细观模型。2D 混凝土细观模型  $[d_s, d_{s+1}]$  级配段内骨料的数量, 可通过式(4)计算<sup>[27]</sup>:

$$A_{agg}[d_s, d_{s+1}] = \frac{P(d_{s+1}) - P(d_s)}{P(d_{max}) - P(d_{min})} \cdot R_{agg} \cdot A_{con}.$$

(4)

式中: $A_{agg}[d_s, d_{s+1}]$ 为 $[d_s, d_{s+1}]$ 级配段内骨料的面积; $A_{con}$ 为混凝土的面积; $R_{agg}$ 为骨料面积比。

1.2 骨料投放程序

随机骨料投放流程如图 1 所示。在随机骨料模型投放程序中,对于新投入骨料必须满足以下两个条件:①生成骨料必须在试件范围内;②不能与之前放置的颗粒有任何重叠。

当满足上述条件之后,考虑到 2D 混凝土细观模型的网格划分,新产生的骨料与其他骨料之间有一个最小的间隙宽度,间隙大于 0.05 倍的半径之和,认为骨料之间没有重叠。对于椭圆形骨料和多边形骨料,使其外接圆不相交,认为骨料之间没有重叠。

混凝土细观模型的边长为 100 mm,在 2D 混凝土细观模型中先产生随机骨料或气

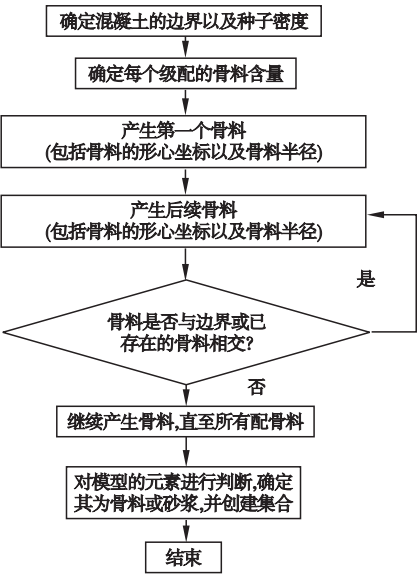


图 1 随机骨料投放流程

Fig. 1 The delivery process of random aggregate  
孔,后对网格进行划分。在 3D 混凝土细观模型中,为了保证模型的收敛性,先对网格进行划分,然后确定随机骨料和气泡。随机骨料模型网格如图 2 所示。

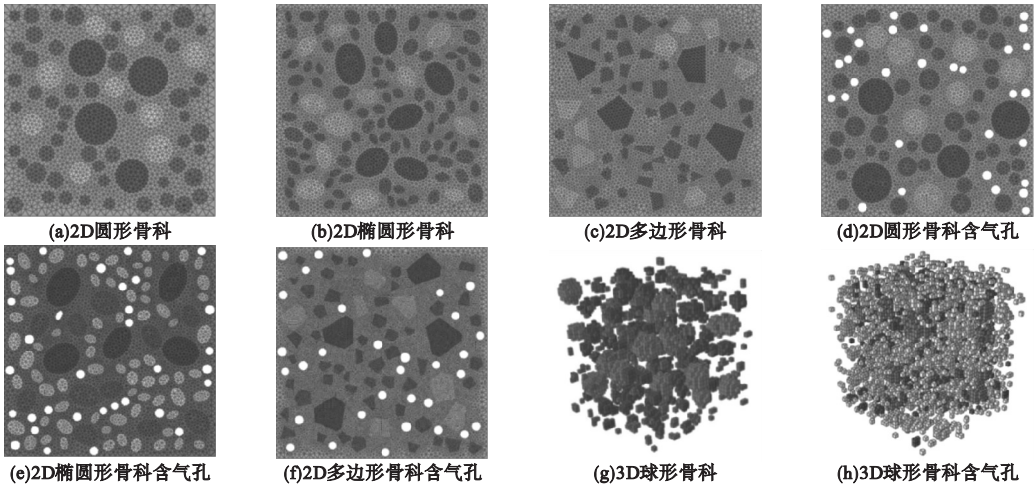


图 2 随机骨料模型网格

Fig. 2 The mesh model of random aggregate

1.3 砂浆损伤

混凝土在受压状态时,混凝土的破坏主要是由于砂浆破碎。因此,笔者采用考虑压拉损伤的混凝土塑性损伤本构(Concrete Damaged Plasticity, CDP)模型。CDP 模型损

伤因子的推导方法较多,但不是每一种方法在 ABAQUS 软件中都能较快较好的计算收敛。根据 Najar 损伤理论,砂浆损伤因子为

$$d = \frac{W_0 - W_\varepsilon}{W_0} = 1 - \frac{W_\varepsilon}{W_0}.$$

(5)

式中:  $W_0 = \frac{E_0 \varepsilon^2}{2}$ ;  $W_\varepsilon = \int \sigma d\varepsilon = \int f(\varepsilon) d\varepsilon$ ;  $W_0$  为无损状态下的应变能,图 3 中  $\triangle OAB$  的面积;  $W_\varepsilon$  为损伤状态下的应变能,图 3 中阴影部分的面积;  $E_0$  为弹性模量。对于无损伤的砂浆,  $W_0 = W_\varepsilon$ , 则  $d = 0$ ; 对于有损伤的砂浆,  $0 < W_\varepsilon < W_0$ , 则  $d \neq 0$ , 在损伤的极限状态,  $W_\varepsilon \ll W_0$ , 则  $d$  趋近于 1。

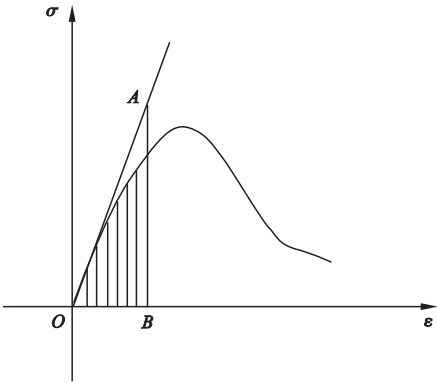


图 3 基于能量的损伤模型

Fig. 3 Energy based damage model

1.4 边界条件

笔者以 2D 圆形骨料细观模型为例,在模型的底部和端部分别建立一个刚体,并对刚体设置加载参考点(RP),约束下侧刚体所有自由度并对上侧刚体进行位移加载,如图 4 所示。

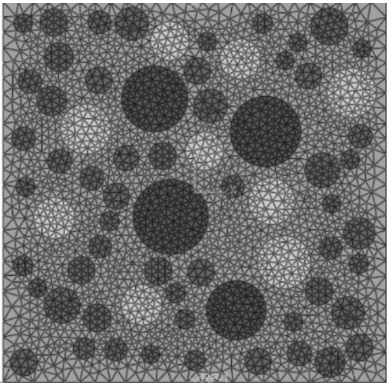


图 4 边界条件

Fig. 4 Boundary condition

2 试验方案及结果分析

2.1 试验方案

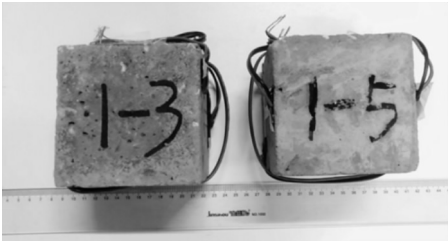
笔者制作了 2 组共 12 个混凝土试件,按照

混凝土砂浆的比例,制作 1 组 6 个砂浆试件,进行单轴压缩试验,混凝土长 × 宽 × 高为 100 mm × 100 mm × 100 mm,砂浆长 × 宽 × 高为 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm,混凝土气孔率  $\alpha$  为 0%、5%。混凝土气孔在混凝土内部均匀分布,混凝土气孔率可由式(1)计算:

$$\alpha = \frac{V_1}{V_2} \tag{6}$$

式中:  $V_1$  为混凝土内部气孔的体积;  $V_2$  为混凝土在压实的情况下的体积。

在每个试件的表面分别粘贴 T 型应变片。试验采用位移加载,试验加载速率为 1.5 mm/min,直至试件破坏。试件及应变片示意如图 5 所示。



(a)混凝土试件编号



(b)应变片

图 5 试件及应变片示意

Fig. 5 Schematic diagram of specimen and strain gauge

2.2 试验结果分析

图 6 给出了不同气孔率(0%、5%)混凝土试件的应力-应变曲线,曲线 1-1 ~ 1-7 和 2-1 ~ 2-7 为不同气孔率(0%、5%)的试验数据拟合曲线。从图中可以看出,当  $\alpha = 5\%$  时,混凝土的抗压强度为无气孔混凝土强度的 80% 左右,弹性模量为无气孔混凝土的 75% 左右,这说明混凝土中孔隙和缺陷



的影响很大,不可以忽略。

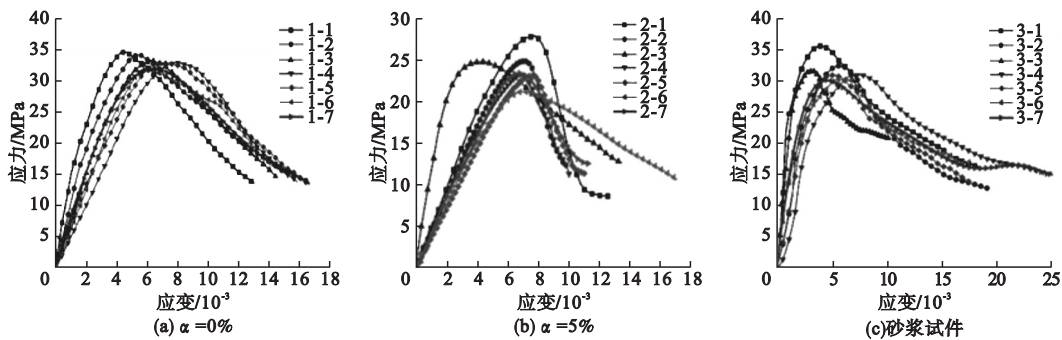


图6 混凝土、砂浆试件应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of concrete and mortar specimens

根据砂浆单轴压缩试验,确定砂浆的力学参数参数。由于骨料抗压强度较高,假设骨料处于弹性阶段,不考虑骨料的非线性和抗压损伤。表1给出了材料的力学参数。

表1 各相材料参数

Table 1 Material parameters of each phase

成分	弹性模量/GPa	泊松比	起始损伤强度/MPa	抗压强度应变
骨料	80.0	0.2	—	—
砂浆	15.1	0.13	7.52	0.005 5

由砂浆的应力-应变拟合曲线,利用Matlab编写程序,计算砂浆的损伤因子,塑性损伤因子与砂浆应力对应关系如图7所示。

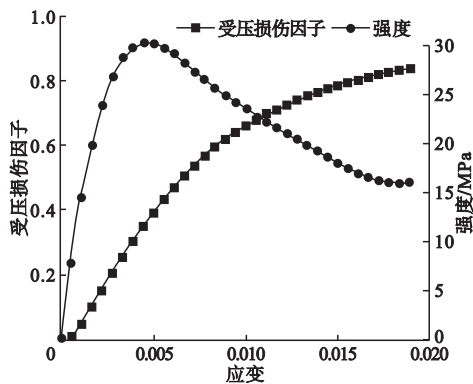


图7 塑性损伤因子与砂浆应力的对应关系

Fig. 7 Corresponding relationship between plastic damage factor and mortar stress

由图7可见,对于砂浆受压损伤,当砂浆

达到最大应力时,砂浆损伤因子接近0.35,因此,当砂浆的损伤因子在0.35以下,砂浆未达到最大应力,基本可以判断砂浆尚未压碎。当砂浆应变达到0.02时,砂浆应力为最大应力的50%,此时的损伤因子约为0.83,此时可认为砂浆受压破坏。

3 不同气孔率下的混凝土细观模拟分析

3.1 气孔率为0%时混凝土细观模拟

当 $\alpha=0\%$ 时,混凝土细观模型分析结果如图8所示,压缩损伤最大值为0.8463。不同形状的随机骨料模型压缩之后,所有混凝土模型的压缩损伤主要沿边缘扩展。

当 $\alpha=0\%$ 时,细观数值模拟曲线如图9所示。由图9可知:当达到抗压强度之后,不同形状的随机骨料展现了不同的下降形式,2D数值模拟分析结果与混凝土宏观应力应变曲线下下降形式不相同,抗压强度迅速降低,然后趋于稳定的趋势。

2D和3D细观数值模拟数据见表2。由表2可知:2D数值模拟分析结果和3D数值模拟结果相差较大,2D随机骨料强度相对误差最小为30.6%。强度压缩应变相对误差为72.5%。3D数值模拟结果与试验曲线在弹性段吻合较好,但在塑性阶段、峰值强度和破坏阶段之间存在差异,强度相对误差为

4.291%。强度压缩应变相对误差为 22.1%。不同形状随机骨料对细观数值模拟

的影响是不同的,3D 随机骨料能更好地模拟混凝土的压缩特性。

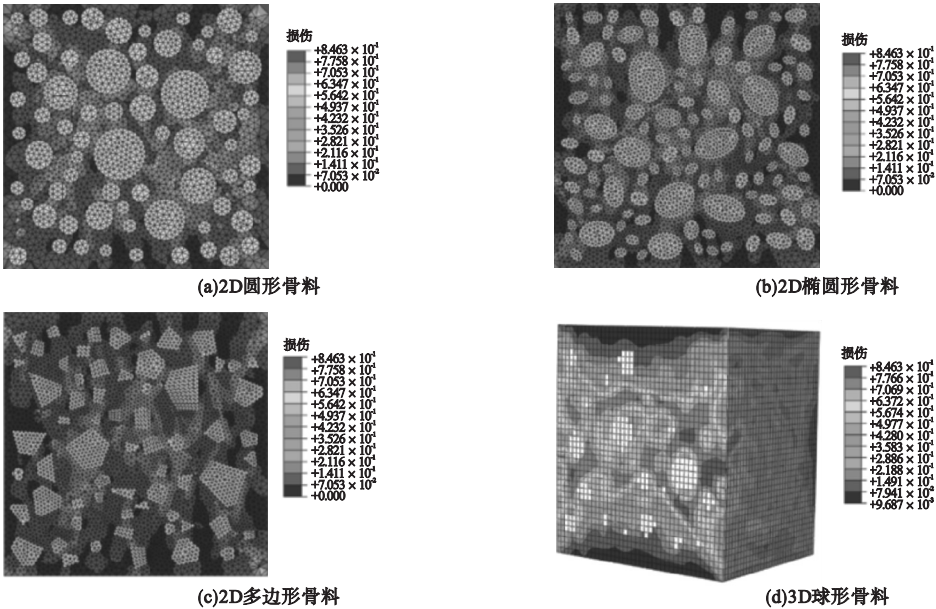


图 8 混凝土细观模拟混凝土细观模型压缩损伤

Fig. 8 Meso simulation of compression damage in concrete meso model

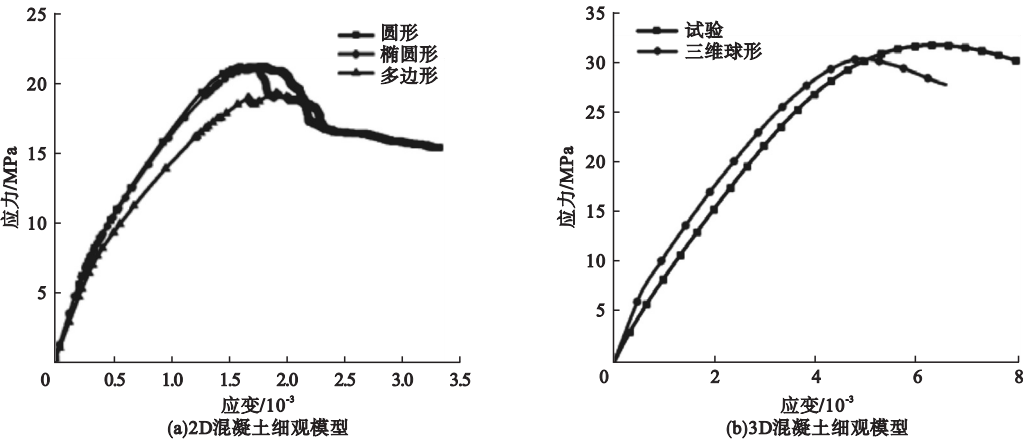


图 9 细观模型的压缩应力 – 应变曲线

Fig. 9 Compressive stress-strain curve of mesoscopic model

表 2  $\alpha = 0\%$  ,混凝土模拟、试验数据

Table 2 The simulation and test data of concrete with  $\alpha = 0\%$

据来源	弹性模量/GPa	强度/MPa	压缩峰值应变/ $10^{-3}$
2D 圆形骨料	29.19	21.42	1.807
2D 椭圆形骨料	26.21	21.29	1.748
2D 多边形骨料	21.94	19.51	1.927
3D 球形骨料	15.94	30.78	4.954
试验	11.65	32.16	6.361

3.2 气孔率为 5% 时的混凝土细观模拟

建立了  $\alpha = 5\%$  时的混凝土 3D 细观模型,对其进行了数值模拟,模拟结果如图 10 所示。由图可知,当  $\alpha = 5\%$  时,3D 细观数值模拟强度与混凝土试件强度在 10% 以内,弹性模量为无气孔混凝土强度的 50% 左右,这说明 3D 细观数值模拟强度较好的模拟混凝土的强度,但弹性模量相差较大。

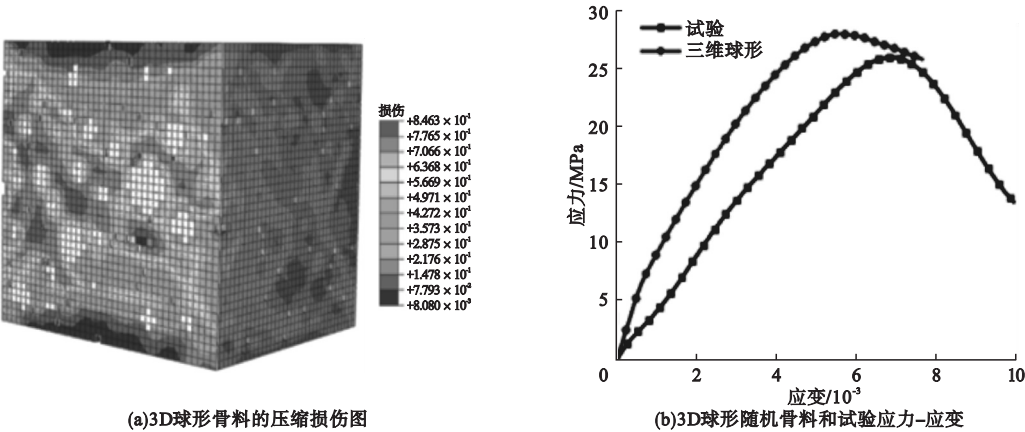


图 10  $\alpha = 5\%$  ,3D 细观模型压缩损伤和应力 - 应变曲线

Fig. 10 Compression damage and stress-strain curves of 3D mesoscopic model with  $\alpha = 5\%$

在单轴加载过程中,气孔导致部分砂浆的损伤,并逐渐延伸到整体砂浆基体中,这说明了混凝土最薄弱的区域在气孔。当遇到强度较高的骨料颗粒时,裂纹扩展将选择规避,直到混凝土在压缩下破坏说明骨料对裂纹的扩展起到一定的阻挡作用。3D 细观模型模拟结果与试验吻合较好,能够较好地计算混凝土的力学性能。

4 结 论

- (1) 骨料几何参数的变化影响了损伤演化路径,数值模拟分析结果为斜剪形破坏。
- (2) 从模型的结果来看,2D 数值模拟分析结果和 3D 数值模拟结果相差较大;2D 随机骨料强度相对误差最小为 30.6%,强度压缩应变相对误差为 72.5%;气孔率为 0% 时,3D 数值模拟强度相对误差为 4.291%,强度压缩应变相对误差为 22.1%;气孔率为 5% 时,3D 细观数值模拟强度与混凝土试件强度在 10% 以内,弹性模量为无气孔混凝土强度的 50% 左右,强度误差在可接受范围内;3D 细观数值模拟相比于 2D 细观数值模拟 3D 细观数值模拟分析更适用于混凝土细观缺陷理论研究。
- (3) 从混凝土细观模型的损伤破坏过程来看,混凝土的初始缺陷及骨料的形状对裂纹的出现能够产生影响,裂纹主要存在于缺

陷及骨料的边缘,并沿着气孔逐渐扩展。

参考文献

[ 1 ] TANG S W,LI Z J,CHEN E,et al. Impedance measurement to characterize the pore structure in Portland cement paste [J]. Construction & building materials,2014,51:106 - 112.

[ 2 ] DH A,DL A ,PH A,et al. Statistical modelling of compressive strength controlled by porosity and pore size distribution for cementitious materials [J]. Cement and concrete composites, 2019, 96:11 - 20.

[ 3 ] 肖诗云,朱梁. 孔隙对混凝土宏观力学性质的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016,32(4):608 - 618.  
(XIAO Shiyun,ZHU Liang. Study on effects of voids on macro - mechanical properties of concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university ( natural science ), 2016, 32 ( 4 ): 608 - 618. )

[ 4 ] ZHANG G, YANG Z, YAN Y, et al. Experimental and theoretical prediction model research on concrete elastic modulus influenced by aggregate gradation and porosity [J] Sustainability,2021,13(4):1811 - 1827.

[ 5 ] DU X,JIN L,MA G. Meso-element equivalent method for the simulation of macro mechanical properties of concrete [J]. International journal of damage mechanics,2013,22(5):617 - 642.

[ 6 ] KIM H,BUTTLAR W G. Multi-scale fracture modeling of asphalt composite structures [J]. Composites science & technology, 2009, 69: 2716 - 2723.

[ 7 ] ZHOU X Q,HAO H. Mesoscale modelling and analysis of damage and fragmentation of concrete slab under contact detonation [J]. International journal of impact engineering, 2009,36(12):1315 - 1326.

[ 8 ] 张颖,刘昌永,王玉银,等. 基于随机骨料模型的混凝土抗压强度尺寸效应研究[J]. 建筑结构学报,2017,38(增刊1):493 - 501.

- (ZHANG Ying, LIU Changyong, WANG Yuyin, et al. Mesoscale modeling based numerical study on size effect of concrete compressive strength [J]. Journal of building structures, 2017, 38(S1):493-501.)
- [9] 金浏,杜修力,黄景琦.多轴加载下混凝土细观破坏模拟的强度准则探讨[J].计算力学学报,2015,32(3):322-331.
- (JIN Liu, DU Xiuli, HUANG Jingqi. Discussion on strength criterion used in the meso-failure of concrete under multi-axial loading conditions [J]. Chinese journal of computational mechanics, 2015, 32(3):322-331.)
- [10] SKAR YŽNSKI Ł, TEJCHMAN J. Experimental investigations of fracture process in concrete by means of X-ray micro-computed tomography [J]. Strain, 2016, 52(1):26-45.
- [11] 袁则循,刘波,毛灵涛.混凝土单轴压缩 CT 观测及三维变形场计算分析[J].工程力学, 2017, 34(5):188-197.
- (YUAN Zexun, LIU Bo, MAO Lingtao. CT observation and internal 3D deformation calculation of concrete under uniaxial compression [J]. Engineering mechanics, 2017, 34(5):188-197.)
- [12] 苏林王,李平杰,肖永顺,等. CT 扫描技术在混凝土结构检测中的应用[J].水运工程, 2015, 12:28-31.
- (SU Linwang, LI Pingjie, XIAO Yongshun, et al. Application of CT scanning technology in detection of concrete structure [J]. Port & waterway engineering, 2015, 12:28-31.)
- [13] KAI L. Effect of fine aggregate size on the overlapping of interfacial transition zone (ITZ) in mortars [J]. Construction and building materials, 2020, 248:1-12.
- [14] LEITE J, SLOWIK V, MIHASHI H. Computer simulation of fracture processes of concrete using mesoscale models of lattice structures [J]. Cement & concrete research, 2004, 34(6):1025-1033.
- [15] DU C B, SUN L G. Numerical simulation of aggregate shapes of two-dimensional concrete and its application [J]. Journal of aerospace engineering, 2007, 20(3):172-178.
- [16] ZHU W C, TANG C A. Numerical simulation on shear fracture process of concrete using mesoscopic mechanical model [J]. Construction & building materials, 2002, 16(8):453-463.
- [17] 赵国旗,仇亚萍,骆英,等.基于细观混凝土模型的时间逆转损伤成像方法[J].力学学报, 2017, 49(4):953-960.
- (ZHAO Guoqi, QIU Yaping, LUO Ying, et al. Damage detection of meso-scale concrete structures based on time reversal method [J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2017, 49(4):953-960.)
- [18] YANG Z J, LI B B, WU J Y. X-ray computed tomography images based phase-field modeling of mesoscopic failure in concrete [J]. Engineering fracture mechanics, 2019, 208:151-170.
- [19] GAO H, ZHANG X, ZHANG Y. Effect of air void structure on strength and interfacial transition zone of concrete [J]. Journal of tongji university, 2014, 42(5):751-756.
- [20] JIVKOV A P, ENGELBERG D L, STEIN R, et al. Pore space and brittle damage evolution in concrete [J]. Engineering fracture mechanics, 2013, 110:378-395.
- [21] REN W, YANG Z, SHARMA R, et al. Two-dimensional X-ray CT image based meso-scale fracture modelling of concrete [J]. Engineering fracture mechanics, 2015, 133:24-39.
- [22] TRAWIŃSKI W, TEJCHMAN J, BOBIŃSKI J. A three-dimensional meso-scale modelling of concrete fracture, based on cohesive elements and X-ray  $\mu$ CT images [J]. Engineering fracture mechanics, 2018, 189:27-50.
- [23] CHEN X, LI J, HUANG S, et al. An automatic concrete crack-detection method fusing point clouds and images based on improved Otsu's algorithm [J]. Sensors, 2021, 21(5):1581-1600.
- [24] 徐青,周祥森,程志诚.基于 Ansys 的混凝土随机骨料模型及细观力学分析[J].武汉大学学报(工学版), 2019(12):1035-1040.
- (XU Qing, ZHOU Xiangsen, CHENG Zhicheng. Random aggregate model and mesomechanics analysis of concrete based on Ansys [J]. Engineering journal of Wuhan university, 2019, 52(12):1035-1040.)
- [25] CHEN H, XU B, MO Y L, et al. Behavior of meso-scale heterogeneous concrete under uniaxial tensile and compressive loadings [J]. Construction and building materials, 2018, 178:418-431.
- [26] XFW A, ZJYB A, JRY C, et al. Monte Carlo simulations of mesoscale fracture modelling of concrete with random aggregates and pores [J]. Construction and building materials, 2015, 75:35-45.
- [27] WANG Z M, KWAN A, CHAN H C. Mesoscopic study of concrete I: generation of random aggregate structure and finite element mesh [J]. Computers & structures, 1999, 70(5):533-544.

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)